

УДК 629.572

А.А. Болотин РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УПРАВЛЯЕМОСТИ СУДОВ НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Применение математического моделирования является в настоящее время необходимым условием успешного проектирования судов на подводных крыльях. Представлено описание методики управляемости судов на подводных крыльях, приведены результаты расчетов.

Ключевые слова: судно на подводных крыльях, гидродинамические характеристики, динамика движения, управляемость, циркуляция, СПК «Полесье».

Введение

Период активного развития судов на подводных крыльях (СПК) приходится на 60–80-е годы прошлого столетия. Методы оценки гидродинамических сил и динамики движения в то время имели в основе экспериментальные исследования. В наши дни методы математического моделирования позволяют существенно расширить и упростить методику исследования движения судов. В данной работе представлен метод оценки управляемости судна на подводных крыльях и выполнены расчеты для СПК «Полесье».

Методика расчета

Для оценки управляемости СПК «Полесье» при движении в крыльевом режиме воспользуемся уравнениями движения судна в боковой плоскости. В боковом движении СПК имеет три степени свободы: поперечные поступательные перемещения вдоль оси Z и два вращательных движения вдоль оси X и Y (ось X направлена вдоль скорости движения, ось Y – вверх, ось Z – вправо). Вращательное движение рассмотрим в системе осей координат связанных с главными центральными осями инерции. Полагая углы дифферента малыми, уравнения движения можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} mV(\dot{\beta} - \omega_y) &= \frac{\rho V^2}{2} S(C_z^\beta \beta + C_y \gamma) + R_{z \text{ возм}}; \\ J_x \dot{\omega}_x &= \frac{\rho V^2}{2} SL(m_x^\beta \beta + m_x^\gamma \gamma + m_x^{\bar{\omega}_x} \bar{\omega}_x + m_x^{\bar{\omega}_y} \bar{\omega}_y) + M_{x \text{ возм}}; \\ J_y \dot{\omega}_y &= \frac{\rho V^2}{2} SL(m_y^\beta \beta + m_y^\gamma \gamma + m_y^{\bar{\omega}_x} \bar{\omega}_x + m_y^{\bar{\omega}_y} \bar{\omega}_y) + M_{y \text{ возм}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где J_x и J_y – моменты инерции относительно соответствующих осей; $\bar{\omega}_x = \frac{\omega_x L}{2V}$ и $\bar{\omega}_y = \frac{\omega_y L}{2V}$ – безразмерные угловые скорости; $C_z^\beta, m_x^\beta, m_y^\beta$ – производные аэродинамических коэффициентов всей крыльевой системы по углу дрейфа; m_x^γ, m_y^γ – производные аэродинамических коэффициентов всей крыльевой системы по углу крена; $m_x^{\bar{\omega}_x}, m_y^{\bar{\omega}_x}$ – производные аэродинамических коэффициентов всей крыльевой системы по безразмерной угловой скорости крена; $m_x^{\bar{\omega}_y}, m_y^{\bar{\omega}_y}$ – производные аэродинамических коэффициентов всей крыльевой системы по безразмерной угловой скорости курса.

В качестве характерного линейного размера L принято значение $L=(L_1+L_2)/2$, где L_1 – размах носового крыла, L_2 – размах кормового крыла. В качестве характерной площади S принята суммарная площадь крыльев.

Производные аэродинамических коэффициентов для всей крыльевой системы определяются следующим образом:

$$C_z^\beta = (C_{z_1}^\beta S_1 + C_{z_2}^\beta S_2) / S \cdot 57,3;$$

$$m_x^\beta = (m_{x_1}^\beta S_1 L_1 + m_{x_2}^\beta S_2 L_2) / S / L \cdot 57,3;$$

$$m_y^\beta = (C_{z_1}^\beta S_1 x_1 + C_{z_2}^\beta S_2 x_2) / S / L;$$

$$m_x^\gamma = (m_{x_1}^\gamma S_1 L_1 + m_{x_2}^\gamma S_2 L_2) / S / L \cdot 57,3;$$

$$m_y^\gamma = 0;$$

$$\bar{m}_x^{\bar{\omega}^x} = -(114,6 \cdot C_{y_1}^\alpha S_1 z_1^2 + C_{z_1}^\beta S_1 y_1^2 + 114,6 \cdot C_{y_2}^\alpha S_2 z_2^2 + C_{z_2}^\beta S_2 y_2^2) / S / L^2;$$

$$\bar{m}_x^{\bar{\omega}^y} = 0;$$

$$\bar{m}_y^{\bar{\omega}^x} = 0;$$

$$\bar{m}_y^{\bar{\omega}^y} = (C_{z_1}^\beta S_1 x_1^2 + C_{z_2}^\beta S_2 x_2^2) / S / L^2.$$

Здесь индекс 1 соответствует носовому крылу, индекс 2 – кормовому; x_1 – отстояние от центра тяжести до точки приложения боковой силы на носовом крыльевом устройстве; x_2 – отстояние от центра тяжести до точки приложения боковой силы на кормовом крыльевом устройстве; z_1, z_2 – расстояние от ДП до точки приложения подъемной силы на половине крыла; y_1, y_2 – расстояние от центра тяжести до точки приложения боковой силы вдоль оси OY .

Возмущающие силы и моменты $R_{z_{\text{возм}}}$, $M_{x_{\text{возм}}}$, $M_{y_{\text{возм}}}$ обусловлены отклонением руля направления и представлены следующим образом:

$$R_{z_{\text{возм}}} = \frac{\rho V^2}{2} S C_z^{\delta_H} \delta_H;$$

$$M_{x_{\text{возм}}} = \frac{\rho V^2}{2} S L m_x^{\delta_H} \delta_H;$$

$$M_{y_{\text{возм}}} = \frac{\rho V^2}{2} S C_z^{\delta_H} \delta_H x_2.$$

Исходные данные

Для СПК «Полесье» производные сил и моментов по параметрам движения и по углу отклонения руля направления для носового и кормового крыльевых устройств приняты согласно [1] и представлены в табл. 1 и 2. Результаты расчета гидродинамических характеристик всей крыльевой системы представлены в табл. 3. При этом, если гидродинамические характеристики изолированных крыльев зависят только от погружения крыла ($\bar{h}=h/b$, где b – хорда крыла), то характеристики системы крыльев зависят и от погружения и от дифферента Ψ . В качестве погружения H (м) принято отстояние точки, расположенной на линии, соединяющей крылья и расположенной под центром тяжести от поверхности воды.

Представленная система уравнений позволяет оценить управляемость СПК по следующим критериям:

- производным статической управляемости;
- параметрам бокового возмущенного движения при переключке руля направления.

Таблица 1
Гидродинамические и геометрические характеристики носового крыла

\bar{h}_1	C_{z1}^α	C_{z1}^β	m_{x1}^β	m_{x1}^γ	$S_1, \text{м}^2$	$L_1, \text{м}$	$x_1, \text{м}$
0,2	0,043	-0,00078	-0,00072	-0,0029	3,47	4,76	7,26
0,4	0,049	-0,00262	-0,00012	-0,0030			
0,6	0,055	-0,00594	0,00044	-0,006			

Таблица 2
Гидродинамические и геометрические характеристики кормового крыла

\bar{h}_1	C_{y2}^α	C_{z2}^β	m_{x2}^β	m_{x2}^γ	$C_z^{\delta \text{H}}$	$m_x^{\delta \text{H}}$	$S_2, \text{м}^2$	$L_2, \text{м}$	$x_2, \text{м}$
0,2	0,02	-0,0009	0,0006	-0,0022	-0,078	-0,0005	2,86	3,3	7,21
0,4	0,037	-0,0026	0,00014	-0,0007	-0,062	-0,0020			
0,6	0,045	-0,0055	0,00013	-0,0003	-0,059	-0,0044			

Таблица 3
Гидродинамические и характеристики крыльевой системы

$H, \text{м}$	0,20			0,25			0,30		
$\Psi_z, ^\circ$	0,8	1,0	1,2	0,8	1,0	1,2	0,8	1,0	1,2
C_y	0,167	0,175	0,183	0,181	0,189	0,196	0,192	0,199	0,206
C_z^β	-0,073	-0,080	-0,089	-0,097	-0,102	-0,110	-0,129	-0,133	-0,139
m_x^β	-0,035	-0,039	-0,044	-0,028	-0,032	-0,037	-0,021	-0,025	-0,028
m_y^β	-0,084	-0,101	-0,117	-0,103	-0,127	-0,151	-0,116	-0,148	-0,179
m_x^γ	-0,273	-0,339	-0,413	-0,158	-0,207	-0,266	-0,077	-0,111	-0,153
$m_x^{\bar{\omega}_x}$	-1,203	-1,202	-1,201	-1,265	-1,264	-1,263	-1,313	-1,312	-1,311
$m_y^{\bar{\omega}_y}$	-0,469	-0,514	-0,573	-0,623	-0,658	-0,707	-0,828	-0,854	-0,893
$C_z^{\delta \text{H}}$	-0,045	-0,052	-0,060	-0,060	-0,068	-0,077	-0,077	-0,086	-0,095
$m_x^{\delta \text{H}}$	0,015	0,017	0,020	0,020	0,022	0,025	0,025	0,028	0,031
$m_y^{\delta \text{H}}$	-0,081	-0,094	-0,107	-0,107	-0,122	-0,137	-0,137	-0,153	-0,170

Расчет производных статической управляемости

Рассмотрим криволинейное установившееся движение (установившийся разворот) с постоянными углами крена и дрейфа и отклоненным рулем направления. В этом случае

$$\dot{\beta} = \dot{\gamma} = \omega_x = 0; \quad \omega_y = \text{const.}$$

Приведя уравнения к безразмерному виду, получаем:

$$-(m_x^\gamma - m_x^{\bar{\omega}_y} \frac{C_Y}{2\mu})\gamma - m_x^\beta \beta = m_x^{\delta \text{H}} \delta_\mu;$$

$$-(m_y^\gamma - m_y^{\bar{\omega}_y} \frac{C_Y}{2\mu})\gamma - m_y^\beta \beta = m_y^{\delta \text{H}} \delta_\mu,$$

где $\mu = \frac{2m}{\rho SL}$ – относительная плотность.

Решая данную систему уравнений, получаем зависимость установившихся значений дрейфа $\beta_{уст}$ и крена $\gamma_{уст}$ от угла отклонения руля направления.

$$\gamma_{уст} = \frac{m_x^{\delta_H} m_y^{\beta} - m_y^{\delta_H} m_x^{\beta}}{(m_x^{\gamma} m_y^{\beta} - m_x^{\beta} m_y^{\gamma}) + \frac{C_y}{2\mu} (m_x^{\beta} m_y^{\bar{\omega}_y} - m_x^{\bar{\omega}_y} m_y^{\beta})} \delta_H;$$

$$\beta_{уст} = \frac{(-m_x^{\delta_H} m_y^{\gamma} + m_y^{\delta_H} m_x^{\gamma}) + \frac{C_y}{2\mu} (m_x^{\delta_H} m_y^{\bar{\omega}_y} - m_x^{\bar{\omega}_y} m_y^{\delta_H})}{(m_x^{\gamma} m_y^{\beta} - m_x^{\beta} m_y^{\gamma}) + \frac{C_y}{2\mu} (m_x^{\beta} m_y^{\bar{\omega}_y} - m_x^{\bar{\omega}_y} m_y^{\beta})} \delta_H;$$

$$\omega_{уст} = -\frac{\rho SV}{2m} (C_z^{\beta} \beta_{уст} + C_y \gamma_{уст}).$$

Учитывая линейный характер зависимости параметров установившегося бокового движения от угла отклонения руля направления, оценить управляемость можно с помощью производных: $\frac{d\beta}{d\delta_H}$, $\frac{d\gamma}{d\delta_H}$, $\frac{d\omega_y}{d\delta_H}$.

Результаты расчета производных статической управляемости для варианта нагрузки соответствующему судну в полном грузу, с полной нормой запасов и топлива, с полным количеством пассажиров и багажа, для скоростей движения 64 км/ч, 69 км/ч и представлены в табл. 4. Погружение крыльев и дифферент судна определялись по методике, предложенной в [2].

Таблица 4
Производные статической управляемости

Скорость	$\frac{d\beta}{d\delta_H}$	$\frac{d\gamma}{d\delta_H}$	$\frac{d\omega_y}{d\delta_H}$
64 км/ч	-0,3580	0,2948	-0,2828
69 км/ч	-0,3219	0,2151	-0,2022

По данным результатам можно определить параметры установившегося разворота при любой перекладке руля. В частности, при отклонении руля на максимальный угол 35° угол дрейфа крена составит $12,3^\circ$ при скорости 64 км/ч и $11,2^\circ$ при скорости 69 км/ч. Угол крена соответственно составит $10,1^\circ$ и $7,3^\circ$, угловая скорость – $9,9^\circ/\text{сек}$ и $7,1^\circ/\text{сек}$. Несложно определить, что диаметр циркуляции при скорости 69 км/ч составит 308 м. Ухудшение характеристик остойчивости при меньшей скорости связано с тем, что движение происходит с большим углом дифферента и при большем погружении кормового крыла. Восстанавливающий момент крена m_x^{γ} кормового крыла с увеличением его погружения заметно уменьшается. Необходимо отметить, что задача решается в постановке, когда скорость движения в процессе циркуляции постоянна.

Расчет параметров бокового возмущенного движения

Для иллюстрации процесса движения СПК «Полесье» на циркуляции в крыльевом режиме проведено математическое моделирование динамики движения судна при перекладке руля направления на постоянный угол. Моделирование проведено путем интегрирования системы уравнений (1) для случая нагрузки судна в полном грузу, с полной нормой запасов и топлива, с полным количеством пассажиров и багажа, и при посадке соответствующей скорости 69 км/ч. Рассмотрены два случая перекладки руля: на максимальный угол $\delta_H = 35^\circ$ и на угол $\delta_H = 15^\circ$.

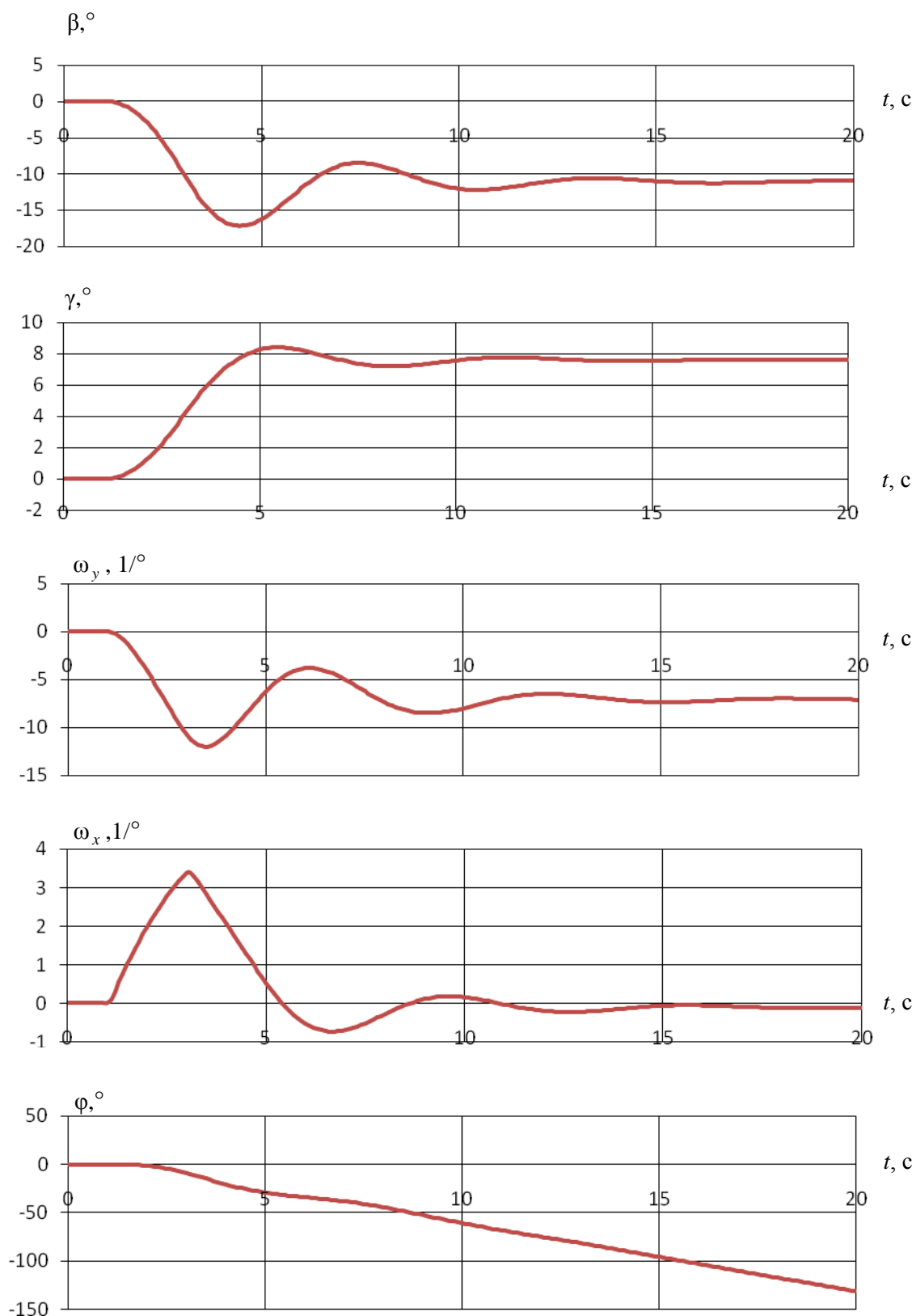


Рис. 1. Изменение параметров движения при перекладке руля на 35°

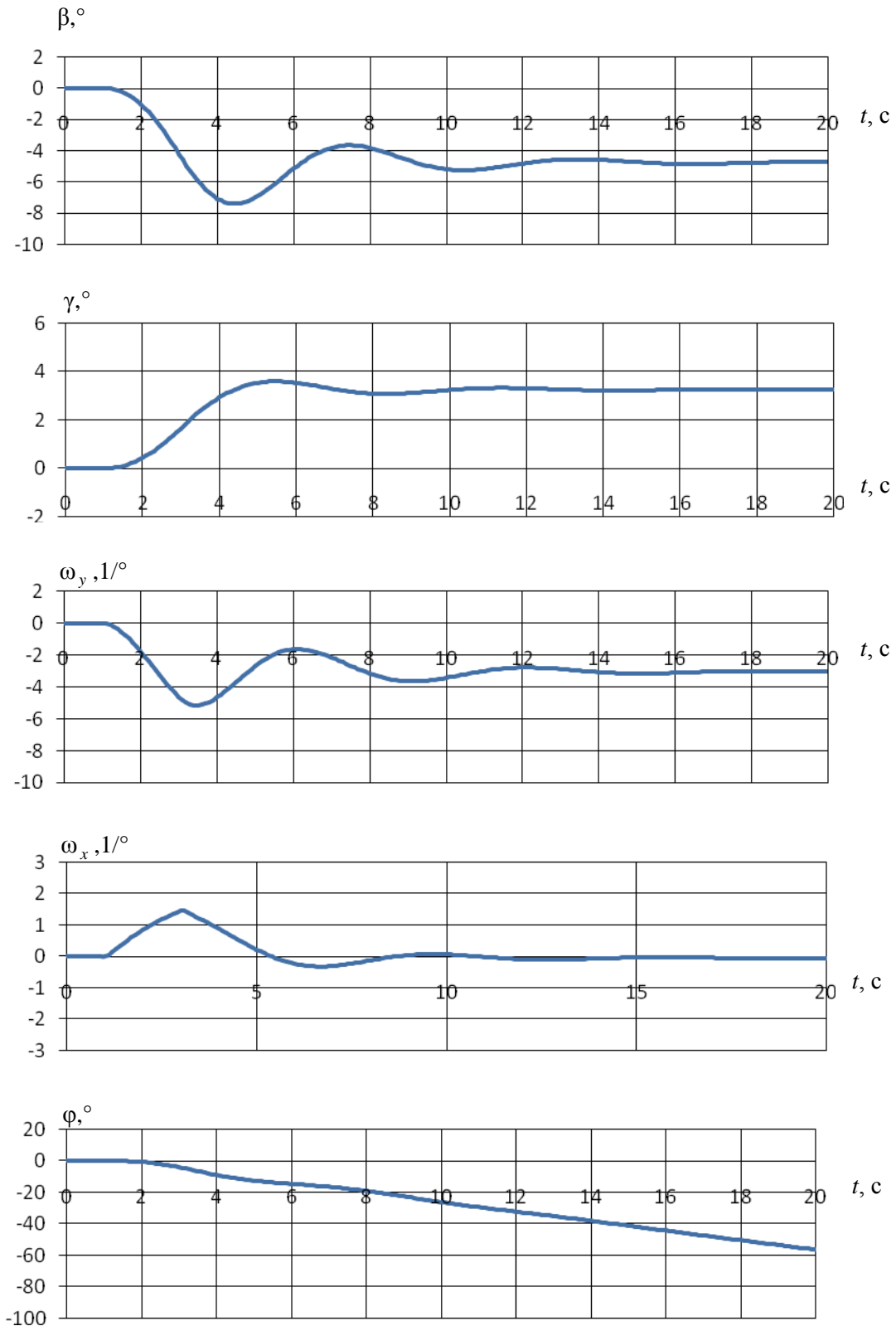


Рис. 2. Изменение параметров движения при перекладке руля на 15°

Для обоих случаев перекладка начиналась на первой секунде движения и осуществлялась равномерно в течение трех секунд. Результаты расчета представлены на рис. 1 и 2, а именно показано изменение во времени следующих параметров движения: угла дрейфа β , угла крена γ , угловой скорости ω_y , угловой скорости ω_x и угла курса φ . В отличие от производных статической управляемости, данные результаты позволяют исследовать переходные процессы при входе в циркуляцию, оценить динамические забросы кинематических параметров, время входа в установившийся разворот.

Результаты, представленные на рис. 1, свидетельствуют, что перекладка руля на максимальный угол при движении в крыльевом режиме приводит к достаточно большим динамическим забросам по крену и дрейфу, которые создадут заметный дискомфорт для пассажиров. Установившиеся значения углов крена и дрейфа достаточно велики, что должно привести к потере скорости на циркуляции и сходу с крылевого режима. В рамках данного расчета скорость считается постоянной. Перекладка руля на 15° (рис. 2) дает значения параметров движения обеспечивающих более комфортную и устойчивую циркуляцию. Диаметр циркуляции при этом увеличивается до 732 м.

Выводы

1. Представлена методика, позволяющая оценить управляемость судов на подводных крыльях. Данная методика, является частью комплекса расчетных методов, позволяющих определять эксплуатационные характеристики СПК, на различных стадиях проектирования.
2. Проведены расчетные исследования по оценке управляемости и динамики движения на циркуляции для СПК «Полесье».

Библиографический список

1. Болотин, А.А. Применение метода дискретных вихрей для исследования подводных крыльев [Текст] // Труды НГТУ им Р.Е. Алексеева. 2015. №3(110). С. 209-213.
2. Болотин, А.А. Методика расчета кривой сопротивления и посадки судна на подводных крыльях [Текст] // Проблемы прочности и пластичности. 2014. Т. 76. №2. С. 172-177.